

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.018.3

### ПОЛУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ АВББШв (4 × 70) ОТ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СХЕМЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ «ФАЗА–ОПЛЕТКА» И «ФАЗА–ФАЗА»

**А. А. АЛФЕРОВ, А. В. ЗАСИМЕНКО, Т. В. АЛФЕРОВА,  
Ю. А. РУДЧЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

#### **Введение**

В последние годы в жилых и общественных зданиях возросло количество нелинейных потребителей (в частности, компьютеров, телевизоров, микроволновых печей, кондиционеров и др.), являющихся источниками высших гармоник, которые негативно влияют на оборудование электрической сети [1].

С внедрением программ по энергосбережению все активнее обычные лампы накаливания заменяются энергосберегающими светодиодными и индукционными; широко применяется частотно-регулируемый привод и вентильно-индукторные двигатели.

Совершенствование электроприемников направлено на повышение коэффициента полезного действия, оптимизацию режима работы и снижение энергопотребления. Большинство таких электроприемников потребляет ток несинусоидальной формы. Несмотря на относительно небольшую мощность каждого отдельного электроприемника, их массовое применение приводит к существенному искажению синусоидальности кривых напряжения и тока в электрических сетях напряжением 380 В.

Основным источником электромагнитных помех в сети, влияющим на кривую напряжения, являются электроприемники потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

По мнению некоторых специалистов [2], в случаях, когда мощность нелинейных потребителей не превышает 10–15 %, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения не возникает. При превышении указанного предела в распределительной сети следует ожидать ухудшения качества электроэнергии.

Высшие гармонические составляющие, присутствующие в кабельных линиях, питающих нелинейные нагрузки, в большинстве случаев приводят к аварийным последствиям: к дополнительному нагреву жил кабелей за счет поверхностного эффекта и эффекта близости; возможному перегреву и разрушению нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами гармоник, кратных трем; увеличению диэлектрических потерь; ускоренному старению изоляции проводов и кабелей [3].

Для анализа влияния нелинейной нагрузки на питающие их кабели необходимо знать, как зависит сопротивление изоляции кабеля от частоты напряжения, приложенного к кабелю. Целью данной работы является получение и анализ зависимостей сопротивлений изоляции кабеля АВББШв (4 × 70) от частоты питающего напряжения для различных схем подключения.

### Основная часть

Для получения экспериментальных данных была собрана испытательная установка, принципиальная схема которой (для опыта «фаза–оплетка (броня)» приведена на рис. 1.

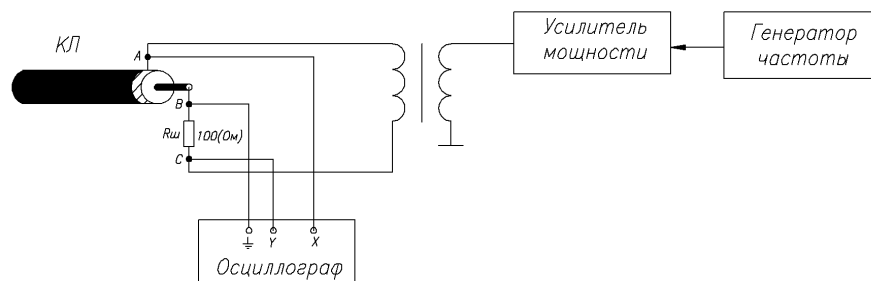


Рис. 1. Принципиальная схема испытательной установки

В ходе проведения эксперимента генератор выдавал напряжение заданной частоты, которое через усилитель мощности подавалось на изоляцию кабеля 0,4 кВ АВБбШв (4 х 70). Напряжение прикладывалось между одной из жил кабеля и оплеткой брони, выполненной из металлических лент.

В ходе эксперимента регистрировалось напряжение на изоляции кабеля  $U_1$  (между точками A и B), падение напряжения  $U_2$  на резисторе  $R_{ш} = 100$  Ом (между точками B и C), частота входного сигнала и угол сдвига между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$ . Данные снимались с осциллографа в виде временных диаграмм напряжений, далее оцифровывались и записывались в файл в виде мгновенных значений.

Данные, полученные после обработки, показаны на рис. 2.

	0	1	2	3
0	50	$1.173 \cdot 10^5$	3.875	131.134
1	50	$1.173 \cdot 10^5$	3.42	106.822
2	51.939	$1.18 \cdot 10^5$	4.275	123.681
3	56.98	$1.194 \cdot 10^5$	4.542	127.519
4	59.944	$1.201 \cdot 10^5$	4.972	129.064
5	62.937	$1.207 \cdot 10^5$	4.647	125.161
6	67.024	$1.215 \cdot 10^5$	4.358	124.33
M = 7	70.028	$1.22 \cdot 10^5$	4.865	120.955
8	72.944	$1.223 \cdot 10^5$	4.814	118.726
9	77.078	$1.228 \cdot 10^5$	4.63	119.778
10	79.972	$1.231 \cdot 10^5$	4.627	119.756
11	83.001	$1.234 \cdot 10^5$	5.049	117.141
12	87.015	$1.239 \cdot 10^5$	4.732	116.689
13	90	$1.24 \cdot 10^5$	5.554	113.06
14	92.975	$1.243 \cdot 10^5$	5.112	125.708
15	97.087	$1.244 \cdot 10^5$	5.894	...

Рис. 2. Данные, полученные после обработки:

0 столбец – частота напряжения  $f$ , Гц; 1 столбец – напряжение  $U_1$ , мВ;  
2 столбец – напряжение  $U_2$ , мВ; 3 столбец – угол  $\varphi$  между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$

Из-за особенностей схемы установки (напряжения  $U_1$  и  $U_2$  направлены встречно), чтобы получить угол сдвига между напряжением, приложенным к изоляции кабеля, и током утечки через изоляцию от измеренного угла, необходимо отнять  $180^\circ$ .

На рис. 3 приведена зависимость входного напряжения ( $U_1$ ), падения напряжения на резисторе ( $U_2$ ) и угла сдвига фаз между напряжениями ( $\phi$ ) от частоты ( $f$ ).

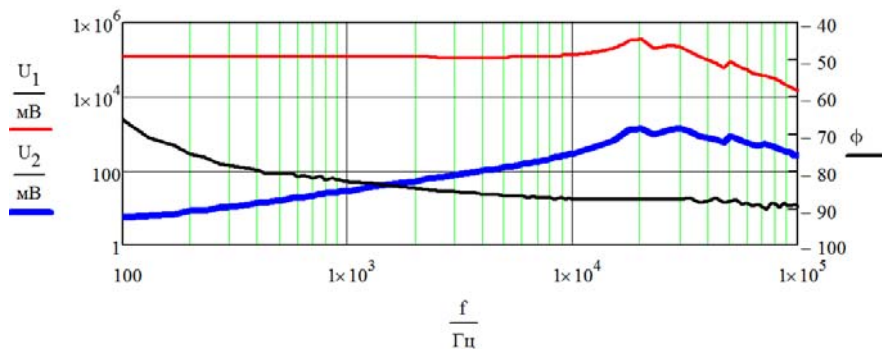


Рис. 3. Зависимость входного напряжения ( $U_1$ ), падения напряжения на резисторе ( $U_2$ ) и угла сдвига фаз между напряжениями ( $\phi$ ) от частоты ( $f$ )

По данным, приведенным на рис. 2, определяется изменение сопротивления изоляции кабеля от частоты питающего напряжения (рис. 4):

$$Z_{iz} = \frac{U_1}{U_2} \cdot 100 \quad \text{— модуль полного сопротивления изоляции;}$$

$$\dot{Z} = \frac{U_1}{U_2} e^{j(\phi-180)} \quad \text{— полное сопротивление изоляции в комплексной экспоненциальной форме;}$$

альной форме;

$$r_{iz} = \text{Re}(\dot{Z}) \quad \text{— активное сопротивление изоляции;}$$

$$x_{iz} = \text{Im}(\dot{Z}) \quad \text{— емкостное сопротивление изоляции.}$$

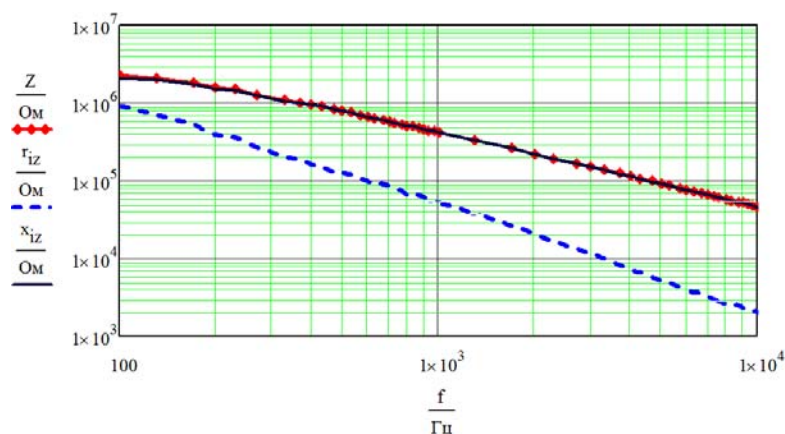


Рис. 4. Зависимости сопротивлений изоляции от частоты питающего напряжения

Из анализа рис. 4 следует, что с повышением частоты сопротивление изоляции уменьшается: так, на частоте 100 Гц активное сопротивление изоляции составляет 92 МОм, а на частоте 470 Гц – 13,2 МОм.

Известно [4], что емкость изоляции зависит от частоты приложенного напряжения. При увеличении частоты емкость уменьшается. Эта зависимость является следствием процессов медленной поляризации, в результате которых происходит накоп-

ление зарядов в диэлектрике, что приводит к увеличению его емкости. При переменном напряжении процесс накопления зарядов ограничен длительностью одного полупериода. Чем выше частота, тем в меньшей степени успевают развиваться процессы поляризации и тем меньшей будет емкость.

Частичную емкость кабеля определяем по выражению (1), не учитывающему изменение частоты:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_d}{r_d}}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, принимается const (для ПВХ принимаем 4,5);  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ ;  $l$  – длина кабельной линии в км, 0,0015 км;  $R_d$  – внешний диаметр изоляции;  $r_d$  – внутренний диаметр изоляции.

Чтобы связать данную формулу с частотой, емкость  $C$  заменим выражением (2):

$$C = \frac{1}{\omega x_c}, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота.

Выражая  $x_c$  из формулы (2) и подставив его в формулу (1), получим выражение (3) для расчета емкостного сопротивления изоляции:

$$x_c = \frac{\ln \frac{R_d}{r_d}}{4\pi^2 \epsilon\epsilon_0 l f}. \quad (3)$$

Для кабеля АВБбШв (4 х 70) отношение  $\ln \frac{R_d}{r_d}$  равно 0,00125.

Сравнительная характеристика емкостного сопротивления изоляции (расчетного – по выражению (3) и экспериментального) приведена на рис. 5.

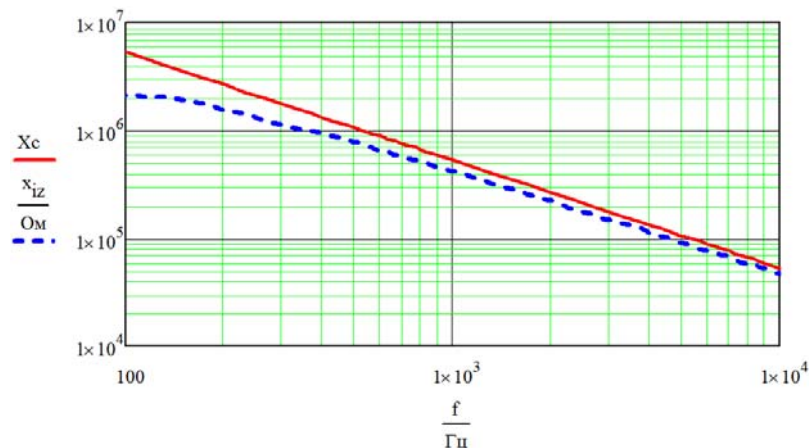


Рис. 5. Сравнение расчетного  $x_c$  и экспериментального  $x_{из}$  емкостного сопротивления изоляции

Из анализа рис. 5 следует, что емкостное сопротивление, полученное в ходе проведения эксперимента и рассчитанное по формуле (3), начиная с частоты 1 кГц, имеют минимальное отклонение друг от друга.

Следует отметить, что величина емкостного сопротивления изоляции, определенная экспериментальным путем, получается более точной, так как она учитывает изменение относительной диэлектрической проницаемости изоляции  $\varepsilon$  в диапазоне частот до 1 кГц, что не учитывается расчетной зависимостью.

Определить активное сопротивление расчетным способом в зависимости от частоты можно, выразив его из выражения (4) для определения потерь активной мощности в изоляции:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к изоляции;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции.

Заменив в выражении (4)  $\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{x}$ , после преобразования получим:

$$R = \frac{P \frac{1}{2\pi f C}}{U^2 2\pi f C}. \quad (5)$$

Построим по выражению (5) расчетную зависимость активного сопротивления изоляции кабеля от частоты. При этом величина  $C$  берется в виде зависимости, полученной экспериментальным путем, чтобы учесть процессы медленной поляризации в диэлектрике при низкой частоте. Потеря мощности для кабельной линии длиной 1,5 м принимается постоянной и равной 0,003 Вт; напряжение принимается постоянным и равным 125 В (среднее экспериментальное значение, выдаваемое установкой). Расчетная и экспериментальная зависимости активного сопротивления от частоты приведены на рис. 6.

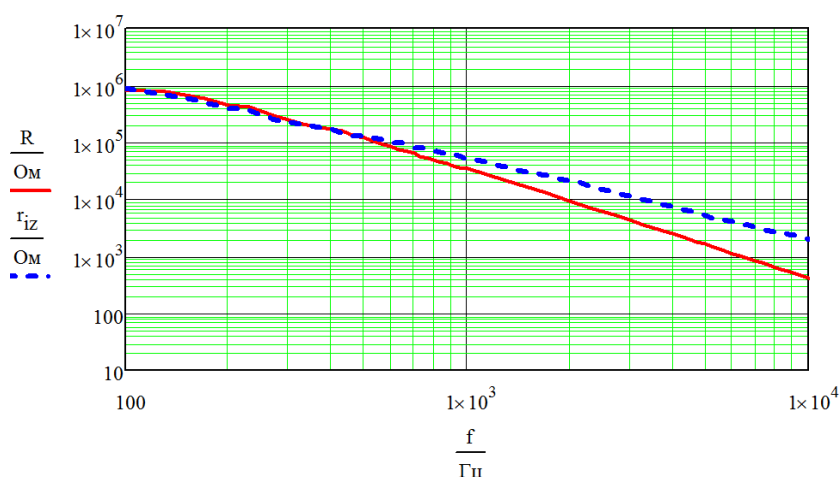


Рис. 6. Зависимость активного сопротивления от частоты

Из анализа рис. 6 следует, что активные сопротивления, полученные экспериментальным и расчетным путем, практически совпадают на частотах до 1 кГц, на более высоких частотах расхождение графиков происходит из-за увеличения потерь мощности и токов утечки через диэлектрик с повышением частоты.

Аналогичным образом были получены экспериментальные данные для схемы подключения «фаза–фаза». Полученные результаты, совмещенные со схемой опыта «фаза–оплетка», приведены на рис. 7 и 8.

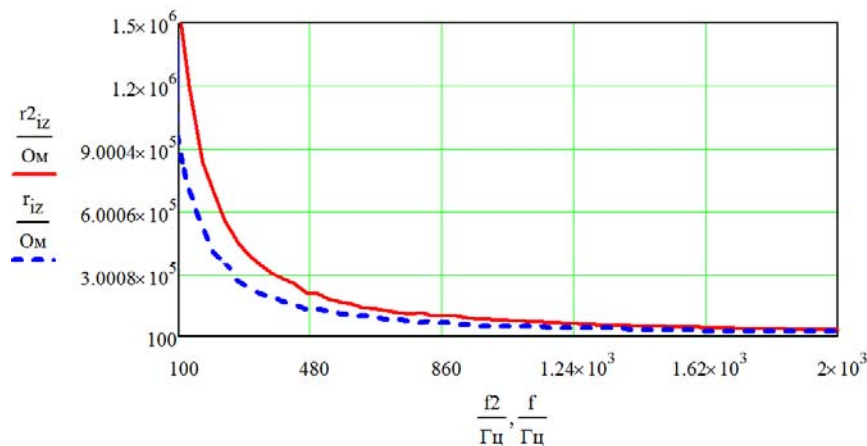


Рис. 7. Зависимость активного сопротивления от частоты:  
 $r_{iz}$  – при схеме подключения «фаза–оплетка»;  $r_{2iz}$  – при схеме «фаза–фаза»

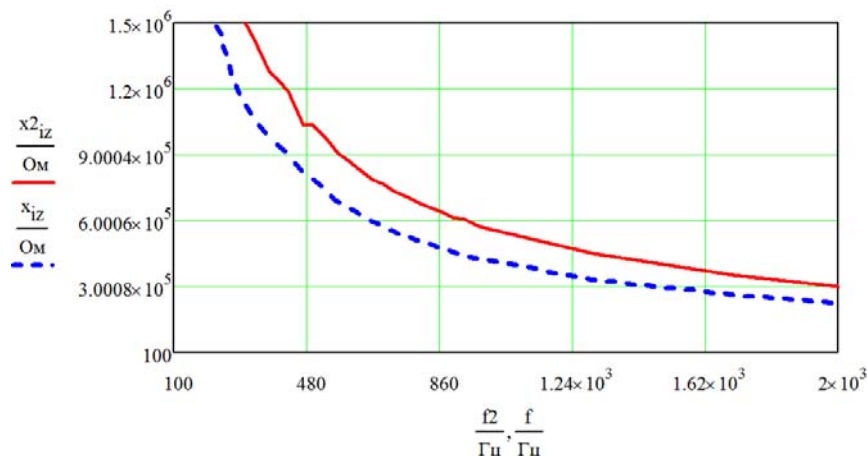


Рис. 8. Зависимость реактивного сопротивления от частоты:  
 $x_{iz}$  – при схеме подключения «фаза–оплетка»;  $x_{2iz}$  – при схеме «фаза–фаза»

Из анализа рис. 7 и 8 следует, что зависимости сопротивлений при схеме подключения «фаза–оплетка» и «фаза–фаза» имеют одинаковую форму и отличаются лишь численными значениями. Слой изоляции в опыте «фаза–фаза» (добавляется сопротивление изоляции 2-й жилы) получается толще, чем в случае опыта «фаза–оплетка», поэтому величина сопротивления изоляции в данном случае больше.

### Заключение

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- с повышением частоты питающего напряжения происходит снижение сопротивления изоляции кабеля АВББШв (4 х 70): на частоте 100 Гц активное сопротивление изоляции составляет 92 МОм, а на частоте 470 Гц – 13,2 МОм;
- зависимости емкостного сопротивления от частоты питающего напряжения, полученные экспериментальным и расчетным путем, начиная с частоты 1 кГц, имеют минимальное отклонение друг от друга;

– практически совпадают на частотах до 1 кГц активные сопротивления, полученные экспериментальным и расчетным путем; из-за увеличения потерь мощности через диэлектрик с повышением частоты на более высоких частотах происходит расхождение графиков;

– при схеме подключения «фаза–оплетка» и «фаза–фаза» зависимости сопротивлений изоляции от частоты имеют одинаковую форму, отличаясь лишь численными значениями. В опыте «фаза–фаза» (добавляется сопротивление изоляции 2-й жилы) слой изоляции получается толще, чем в опыте «фаза–оплетка», по этой причине величина сопротивления изоляции в данном случае больше.

### Литература

1. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский [и др.] // Промышл. энергетика. – 2013. – № 5. – С. 42–47.
2. Влияние электронного оборудования на условия работы систем электроснабжения зданий / О. А. Григорьев [и др.] // Технологии электромагнит. совместимости. – 2003. – № 1 (4). – С. 53–57.
3. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
4. Балашов, А. И. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А. И. Балашов, М. А. Боев, А. С. Воронцов ; под ред. И. Б. Пешкова. – М. : Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.

*Получено 11.11.2014 г.*